

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

กลไกการสูญเสียหลักของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลาง Major Loss Mechanism in Stirling Engine with Moderate Temperature Difference

กฤษลิน ถมยาบัตร และอังคีร์ ศรีภคการ*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กทม. 10330
โทร 0 2218 6595 โทรสาร 0 2252 1889 *อีเมลล์ angkee.s@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสูญเสียหลักของเครื่องยนต์ผลต่างอุณหภูมิปานกลางขนาด 100 W ใน 4 รูปแบบด้วยกันคือ การสูญเสียภายนอกเครื่องยนต์, ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์, การสูญเสียทางกล และการสูญเสียความดันภายใน buffer space เพื่อประเมินการสูญเสียหลักที่ภาวะการทำงานที่กำลังขาออกสูงสุด และเปรียบเทียบการสูญเสียหลักของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลต่างอุณหภูมิปานกลางที่ทดสอบกับผลของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลต่างอุณหภูมิสูงและต่ำที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรม การประเมินการสูญเสียทำโดย ทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ที่ระดับความดัน 7 bar และมีอุณหภูมิที่ผิวนอก 500 °C เพื่อวัดกำลังขาออกและความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ จากนั้นทำการทดสอบการสูญเสียทางกลและการสูญเสียภายใน buffer space เพื่อนำมาประเมินความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์จริง และการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ ในส่วนการเปรียบเทียบการสูญเสียจะใช้ตัวแปรไร้มิติในการเปรียบเทียบ ผลการประเมินพบว่าการสูญเสียหลักคือการสูญเสียภายนอกเครื่องยนต์และความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นเหมือนกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลต่างอุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ประสิทธิภาพ indicated มีค่าอยู่ที่กลางระหว่างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลต่างอุณหภูมิสูงและต่ำและการสูญเสียทางกลจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเหมือนกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลต่างอุณหภูมิสูง

คำหลัก: เครื่องยนต์สเตอร์ลิง, การสูญเสีย, การสูญเสียทางกล

Abstract

This work attempts to identify the major loss mechanisms in the moderate temperature differential Stirling engine (MDSE) with 100 W power output. Four types of loss are investigated including heat loss to the environment, heat rejection to the water jacket, mechanical loss and pressure loss in the buffer space. The behavior of major loss are compared that of high and low temperature differential Stirling engine (HDSE and LDSE) available from literature. The engine was tested at 7 bar charged pressure and 500°C outside of the heater wall. This study includes heat loss to the environment and heat rejection to the water jacket as the major losses. In term of dimensionless parameter, heat rejection to the water jacket increases with the engine speed similar to LDSE. The indicated efficiency is in between HDSE and

LDSE pointing to the potential of MDSE design. The mechanical loss follows the trend of HDSE while still considered one of the minor loss.

Keywords: Stirling engine, loss, mechanical loss.

1. บทนำ

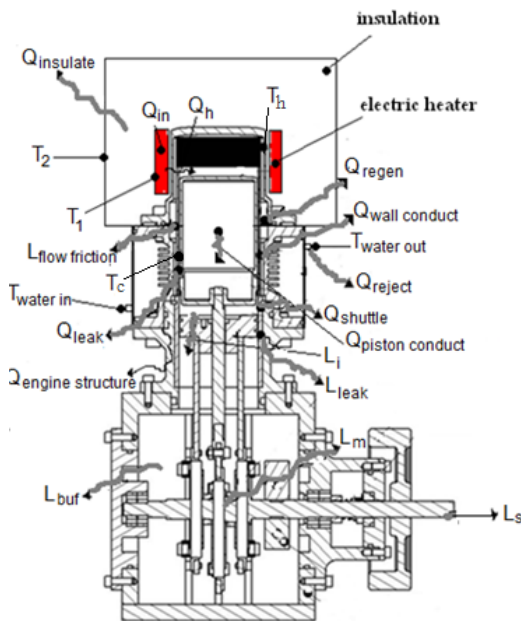
เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องต้นกำลังรูปแบบหนึ่งที่มีความสนใจในการวิจัยและพัฒนาเนื่องจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลาย เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนของไอเสียจากโรงงาน และอื่นๆ นอกจากนี้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงยังมีมลภาวะต่ำและมีเสียงเบาขณะทำงาน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องต้นกำลังที่ตอบสนองต่อความต้องการทั้งทางด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน แต่เครื่องยนต์สเตอร์ลิงยังมีข้อจำกัดในการนำมาใช้ทดแทนเครื่องต้นกำลังในปัจจุบันคือ สำหรับในทางทฤษฎีวัฏจักรสเตอร์ลิงจะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงวัฏจักรคาร์โนมากที่สุดเมื่อเทียบกับวัฏจักรอื่นๆ แต่ในความเป็นจริงเครื่องยนต์สเตอร์ลิงยังมีประสิทธิภาพทางความร้อนต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์เบนซินและดีเซล เนื่องจากการสูญเสียที่เกิดขึ้นของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง จากข้อจำกัดดังกล่าวทำให้มีนักวิจัยหลายท่านทำการศึกษาการสูญเสียในเครื่องยนต์เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องยนต์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

นอกจากการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์แล้วยังมีการพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงให้เหมาะสมกับแหล่งพลังงานความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์โดยแบ่งเป็น 3 รูปแบบตามผลต่างอุณหภูมิด้านฮีตเตอร์และคูลเลอร์ ($\Delta T = T_h - T_c$) คือ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลต่างอุณหภูมิสูงหรือ High temperature differential stirling engine (HDSE) ($\Delta T > 500^\circ\text{C}$) สำหรับใช้ร่วมกับ ก๊าซเผาไหม้และการสันดาปภายในของก๊าซไฮโดรเจน[1-3], เครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลต่างอุณหภูมิต่ำหรือ Moderate temperature differential Stirling engine (MDSE)

($\Delta T = 300 \sim 500^\circ\text{C}$) สำหรับใช้ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์[4] และเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลต่างอุณหภูมิต่ำหรือ Low temperature differential Stirling engine (LDSE) ($\Delta T < 300^\circ\text{C}$) สำหรับใช้ร่วมกับความร้อนเหลือทิ้ง [5,6] จากการพัฒนาเครื่องยนต์ทั้งทางด้านประสิทธิภาพและความเหมาะสมกับแหล่งพลังงานทำให้ทราบว่าการสูญเสียของ HDSE และ LDSE มีลักษณะแตกต่างกัน [6] ดังนั้นผู้วิจัยจึงศึกษาการสูญเสียที่เกิดขึ้นของ MDSE ที่ได้พัฒนาไว้ก่อนแล้ว[4] เพื่อประเมินการสูญเสียหลักของเครื่องยนต์ ผลการประเมินจะนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงเครื่องยนต์ให้มีประสิทธิภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นและเปรียบเทียบการสูญเสียของ MDSE กับ HDSE และ LDSE ที่ได้จากการเปรียบเทียบของ Siwamoto [6]

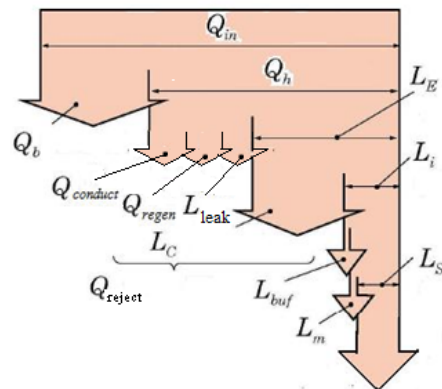
2. กลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

การสูญเสียที่เกิดขึ้นของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถแบ่งตามลักษณะที่เกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ ดังนี้ได้ดังนี้คือ การสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านฉนวน ($Q_{insulate}$), การสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านโครงสร้างเครื่องยนต์ ($Q_{engine\ structure}$), การสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนในส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์ซึ่งระบายออกไปกับน้ำหล่อเย็น ($Q_{conduct}$) [6], การสูญเสียความดันภายใน regenerator ($L_{flow\ friction}$) [1], regenerator loss (Q_{regen}) [2], การสูญเสียความดันเนื่องจากการรั่วที่แหวนลูกสูบกำลัง (L_{leak}) [7], การสูญเสียทางกล (L_m) [1] และการสูญเสียความดันภายใน buffer space (L_{buf}) [6] จากที่กล่าวมาข้างต้นการสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดภายในเครื่องยนต์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

สำหรับการสูญเสียที่แบ่งตามลักษณะการเกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ข้างต้นสามารถนำมารวมกันได้เป็น 4 ประเภทคือ การสูญเสียภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) ซึ่งประกอบด้วย $Q_{insulate}$ และ $Q_{engine structure}$, ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ (Q_{reject}) ซึ่งเป็นผลรวมของ $Q_{conduct}$, Q_{regen} และ L_{leak} , การสูญเสียทางกล (L_m) และ การสูญเสียความดันภายใน buffer space (L_{buf}) โดยที่ Q_{in} คือ ความร้อนที่ให้แก่ระบบ, Q_h คือ ความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์จริง, L_e คือ expansion power, L_c คือ compression power, L_i คือ indicated power และ L_s คือ shaft power ซึ่งผลรวมของการสูญเสียข้างต้น และกำลังในส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์สามารถแสดงเป็นแผนภาพการไหลพลังงานภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลต่างอุณหภูมิปานกลางที่มีอยู่ได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพการสูญเสียภายในของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลต่างอุณหภูมิปานกลาง

2.1 การสูญเสียภายนอกเครื่องยนต์

การสูญเสียภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) คือการสูญเสียความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อมก่อนที่จะความร้อนนี้จะเข้าสู่เครื่องยนต์ประกอบไปด้วยการนำความร้อนผ่านฉนวนและการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านโครงสร้างเครื่องยนต์ ด้านบนที่มีอุณหภูมิสูงลงมาสู่ด้านล่างที่มีอุณหภูมิต่ำซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ขดลวดความร้อนเป็นแหล่งพลังงานให้กับเครื่องยนต์จึงมีความจำเป็นต้องใช้ฉนวนหุ้มด้านนอกเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อม

สำหรับวิธีการประเมินการสูญเสียภายนอกเครื่องยนต์ Koichi hirata [1] ได้เสนอความสัมพันธ์ซึ่งใช้ในประเมินการสูญเสียภายนอกเครื่องยนต์จากการประเมินความร้อนที่เข้าสู่เครื่องยนต์จริงแสดงไว้ดังสมการ

$$Q_h = Q_{reject} + L_i \quad (1)$$

เมื่อ L_i คือ indicated power (W) จากนั้นการสูญเสียภายนอกเครื่องยนต์อาจประเมินดังสมการ

$$Q_b = Q_{in} - Q_h \quad (2)$$

เมื่อ Q_{in} คือ ความร้อนที่ให้แก่ระบบ (W)

2.2 ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์

ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ (Q_{reject}) คือความร้อนส่วนที่ไม่ได้นำไปใช้ผลิตงานภายในเครื่องยนต์จึงจำเป็นต้องระบายออกไปกับน้ำหล่อเย็น

เพื่อลดอุณหภูมิของก๊าซทำงานที่จะไหลไปยังปริมาตรด้านอัดตัวซึ่งประกอบไปด้วย การสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนในส่วนต่างๆของเครื่องยนต์ซึ่งระบายออกไปกับน้ำหล่อเย็น, regenerator loss ซึ่งเป็นการสูญเสียความร้อนเนื่องจาก regenerator ไม่สามารถรับและคายความร้อนได้ทั้งหมดเมื่อก๊าซทำงานไหลผ่าน, การสูญเสียความดันเนื่องจากการรั่วที่แหวนลูกสูบกำลัง และ compression power (L_c)

การประเมินความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์กระทำโดยติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ทางเข้าและออกของน้ำหล่อเย็นเพื่อวัดอุณหภูมิน้ำขาเข้าและออกจากนั้นนำมาคำนวณดังสมการ

$$Q_{reject} = \dot{m}_{water} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (3)$$

เมื่อ $\dot{m}_{water}$ คือ อัตราการไหลของน้ำ (kg/s), c_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (J/kg K), T_{out} คือ อุณหภูมิน้ำขาออก ($^{\circ}\text{C}$), T_{in} คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้า ($^{\circ}\text{C}$)

2.3 การสูญเสียทางกล

การสูญเสียทางกล (L_m) คือ การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานภายในกลไกต่างๆของเครื่องยนต์เช่น กระบอกสูบกับลูกสูบ, bearing, แรงเสียดทานภายในกลไกขับเคลื่อนและก้านสูบกับลูกสูบของลูกสูบกำลัง ซึ่งมีผลทำให้กำลังขาออก (L_s) ของเครื่องยนต์ลดลง

สำหรับวิธีการประเมินการสูญเสียทางกล C.M. Hargreaves [7] ได้เสนอแนวทางในการประเมินดังนี้คือ ทำการเปิดฝาสูบออกเพื่อตัดผลของแรงดันภายในกระบอกสูบและเปิด buffer space เพื่อตัดผลกระทบจากการสูญเสียภายใน buffer space จากนั้นใช้มอเตอร์หมุนเครื่องยนต์ แล้วนำกำลังไฟฟ้าที่วัดได้ ($L_{electric}$) มาหักลบกับกำลังจากการสูญเสียภายในมอเตอร์ ($L_{motor loss}$) ผลลัพธ์ที่ได้แสดงไว้ดังสมการ

$$L_m = L_{electric} - L_{motor loss} \quad (4)$$

นอกจากนี้ยังมีวิธีการประเมินอีกวิธีหนึ่งซึ่งเสนอโดย Koichi hirata [1] คือ การนำ indicated power ที่วัดมาหักลบกับกำลังขาออกที่วัดได้ โดยละทิ้งผลของการ

สูญเสียภายใน buffer space เนื่องจากมีค่าน้อยซึ่งการประเมินด้วยวิธีดังกล่าวแสดงความสัมพันธ์ไว้ดังสมการ

$$L_m = L_i - L_s \quad (5)$$

สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้มอเตอร์ DC ประกอบเข้ากับแขนแรงเพื่อวัดแรงบิดที่เกิดขึ้นเพื่อนำมาคำนวณการสูญเสียทางกลแทนการทดสอบการสูญเสียของมอเตอร์ซึ่งนำมาคำนวณการสูญเสียทางกลด้วยสมการที่ 4

2.4 การสูญเสียภายใน buffer space

การสูญเสียภายใน buffer space (L_{buf}) คือการสูญเสียเนื่องจากการขยายตัวและหดตัวของก๊าซภายใน buffer space ที่กระทำต่อลูกสูบกำลัง มีผลทำให้เกิดกระบวนการผันกลับไม่ได้และการสูญเสียพลังงาน

ในส่วนของการประเมินการสูญเสียความดันภายใน buffer space นั้น Artin der minassians [6] ได้เสนอความสัมพันธ์ที่ใช้ในการประเมินซึ่งจะได้เป็นค่าเฉลี่ยของการสูญเสียความดันภายใน buffer space ไว้ดังสมการ

$$L_{buf} = \sqrt{\frac{1}{32} \omega \gamma^3 (\gamma - 1) T_w P_{mean} k \left(\frac{V_m}{V_o} \right)^2 A_w} \quad (6)$$

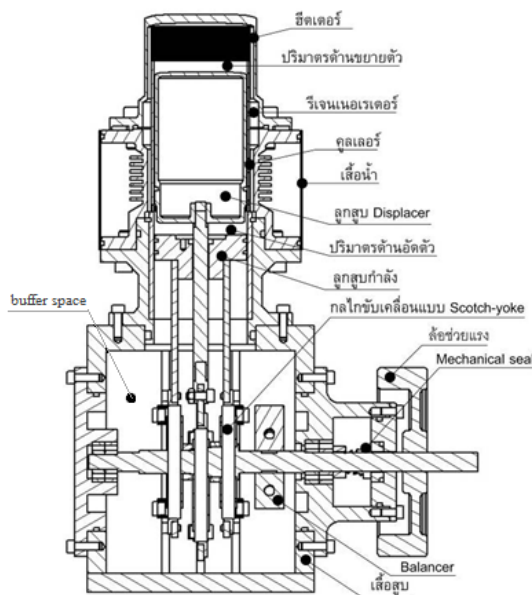
เมื่อ γ คือ อัตราส่วนระหว่างความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่กับความจุความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่, T_w คือ อุณหภูมิที่ผนัง buffer space, A_w คือ พื้นที่ที่ก๊าซทำงานไหลผ่าน, V_m คือ ปริมาตรสูงสุดและ V_o คือ ปริมาตรคงที่ของ buffer space

สมการข้างต้นจะนำมาใช้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ buffer loss ที่ได้ว่าใกล้เคียงกันหรือไม่

3. วิธีการประเมินการสูญเสียของเครื่องยนต์

3.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้ [4] เป็นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางซึ่งภาพตัดขวางของเครื่องยนต์แสดงไว้ดังรูปที่ 3 และข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์แสดงไว้ดังตารางที่ 1

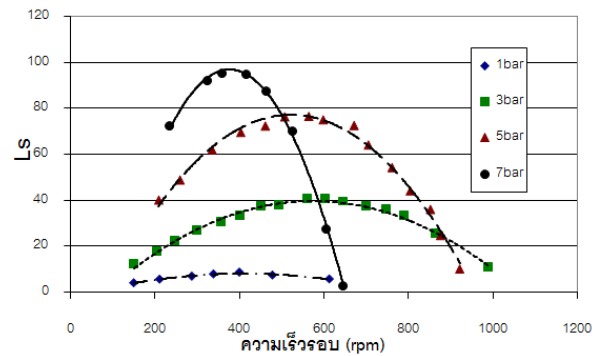


รูปที่ 3 ภาพตัดขวางของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ 1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์

ปริมาตรกวาดค้ำขยายตัว	165 cc
มุมต่างปริมาตร	120
ความเร็วรอบเครื่องยนต์	630 rpm
เส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบระยะชัก	74x37 mm
ปริมาตรค้ำอัดตัวค้ำขยายตัว	1:1
อัตราส่วนการอัด	1.61
ปริมาตรคงที่ซีตเตอร์	20 cc
ปริมาตรกวาดค้ำขยายตัว	165 cc
มุมต่างปริมาตร	120
รูปแบบซีตเตอร์	Slot/ ขดลวดไฟฟ้า
ปริมาตรคงที่คูลเลอร์	16.5 cc
รูปแบบคูลเลอร์	Slot/ น้ำหล่อเย็น
ปริมาตรคงที่รีเจนเนอเรเตอร์	47 cc
ความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์	75%
รูปแบบเครื่องยนต์	เบตา

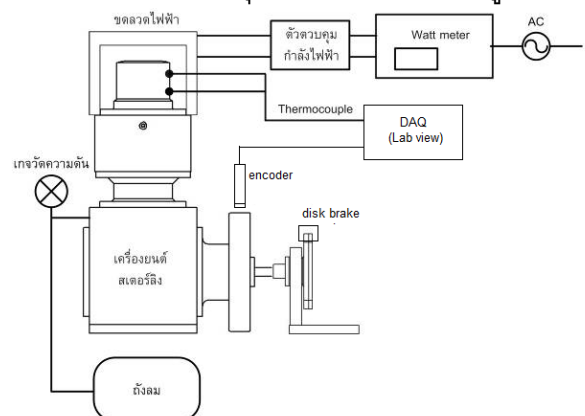
ผลการทดสอบสมรรถนะพบว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางที่มีอยู่ได้กำลัง 95 W ที่ความดัน 7 bar อุณหภูมิที่ผิวนอก 500 °C โดยใช้ขดลวดความร้อนเป็นแหล่งพลังงานได้ และวัดกำลังขาออกด้วยแชนแนลซึ่งไปยึดติดกับแผ่นจานเบรก ผลการวัดสมรรถนะแสดงไว้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผลการวัดสมรรถนะเครื่องยนต์ที่อุณหภูมิผิวนอก 500 °C ที่ระดับความดันต่างๆ

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบและอุปกรณ์การวัด

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบจะประกอบไปด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับใช้ทดสอบการสูญเสียทางกล และการสูญเสียเนื่องจากความดันภายใน buffer space, ฉนวนใช้สำหรับกันความร้อนจากขดลวดความร้อนออกสู่ภายนอก และถังลมใช้สำหรับเติมลมเข้าสู่ระบบ ในส่วนอุปกรณ์การวัด การวัดแรงบิดของเครื่องยนต์ทำได้ด้วยการใช้แชนแนลไปยึดติดกับแผ่นจานเบรก และมอเตอร์ไฟฟ้า, เทอร์โมคัปเปิลชนิด K สำหรับวัดอุณหภูมิตามจุดต่างๆ, encoder สำหรับวัดความเร็วรอบ, โปรแกรม Lab view สำหรับใช้ประมวลผล และเครื่องวัดกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับวัดกำลังไฟฟ้าของขดลวดความร้อน ซึ่งแผนผังเครื่องมือทดสอบและอุปกรณ์การวัดแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนผังเครื่องมือทดสอบและอุปกรณ์การวัด

3.3 การประเมินการสูญเสีย

การประเมินการสูญเสียที่เกิดขึ้นของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเพื่อนำไปใช้ระบุการสูญเสียหลักของ

เครื่องยนต์ทำได้โดยทดสอบการสูญเสียทางกลโดยถอดฝาสูบออกเพื่อตัดผลกระทบจากแรงต้านเนื่องจากความดันที่ด้านบนลูกสูบ displacer และเปิด buffer space เพื่อตัดผลกระทบจากการสูญเสียความดันภายใน buffer space จากนั้นใช้มอเตอร์หมุนเครื่องยนต์เพื่อวัดแรงบิดที่ได้ แล้วนำมาคำนวณหาการสูญเสียทางกลจาก

$$L_m = 2\pi \left(\frac{n}{60} \right) T \quad (7)$$

เมื่อ n คือ ความเร็วรอบ (rpm), T คือ แรงบิด (Nm)

สำหรับการสูญเสียภายใน buffer space (L_{buf}) นั้น สามารถทดสอบโดยใช้วิธีเดียวกันกับการสูญเสียทางกลแต่ปิด buffer space แทน จากนั้นนำผลที่ได้มาคำนวณหาการสูญเสียความดันภายใน buffer space จาก

$$L_{buf} = L_{motor@closed} - L_{motor@open} \quad (8)$$

เมื่อ $L_{motor@closed}$ คือกำลังไฟฟ้าที่วัดของมอเตอร์เมื่อปิด buffer space และ $L_{motor@open}$ คือกำลังไฟฟ้าที่วัดของมอเตอร์เมื่อเปิด buffer space

หลังจากที่ทราบการสูญเสียทางกลและการสูญเสียความดันภายใน buffer space แล้วสามารถนำมาประเมินหา indicated power ตามแนวคิดของ Koichi Hirata [1] ได้จาก

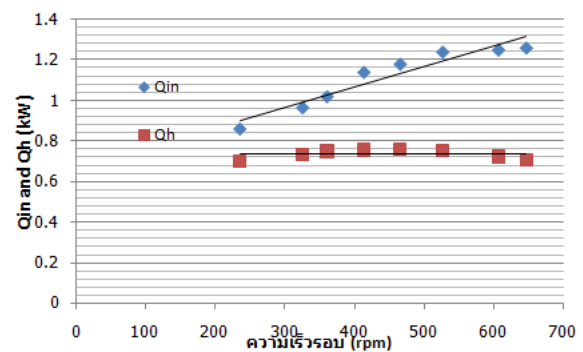
$$L_i = L_s + L_m + L_{buf} \quad (9)$$

สำหรับการสูญเสียภายนอกเครื่องยนต์ทำได้โดยวัดความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ซึ่งได้จากการวัดอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของน้ำหล่อเย็น จากนั้นนำมาคำนวณหาความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์จากสมการที่ 3 เมื่อได้ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์แล้ว ผลการทดสอบที่ได้จะนำมารวมกับ indicated power ที่ได้จากวิธีข้างต้น ผลที่ได้คือความร้อนที่เข้าสู่เครื่องยนต์จริง (Q_h) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1 จากนั้นนำความร้อนที่เข้าสู่เครื่องยนต์จริงมาประเมินการสูญเสียภายนอกเครื่องยนต์จากสมการที่ 2

ในงานวิจัยนี้จะประเมินการสูญเสียที่เกิดขึ้นของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลต่างอุณหภูมิปานกลางที่มีอยู่

โดยมีเงื่อนไขการทดสอบคือ ทดสอบที่กำลังขาออกสูงสุด โดยทำการทดสอบที่ระดับความดัน 7 บาร์, อุณหภูมิผิวนอก 500 °C และมีอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาออก 33.6 °C

สำหรับการเปรียบเทียบการสูญเสียหลักของ MDSE กับ HDSE และ LDSE จะใช้การเปรียบเทียบด้วยตัวแปรไร้มิติซึ่งการสูญเสียทางกล, ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ และ indicated power จะใช้ความร้อนที่ให้แกเครื่องยนต์จริง (Q_h) เป็นตัวหาร ซึ่งความร้อนที่ให้แกเครื่องยนต์และความร้อนที่ให้แกเครื่องยนต์จริงแสดงดังรูปที่ 6 และในส่วนของความเร็วนรอบจะใช้ความเร็วนรอบที่กำลังขาออกสูงสุดเป็นตัวหาร คือ 360 rpm

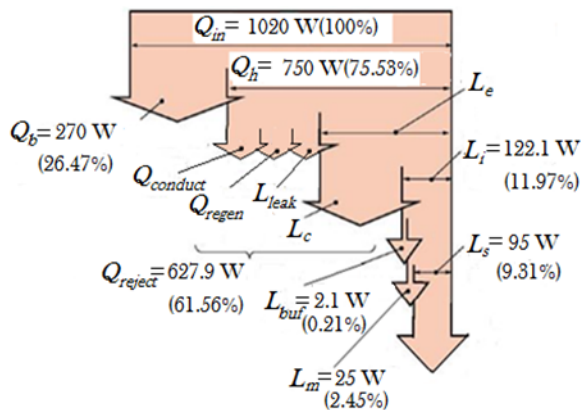


รูปที่ 6 ความร้อนที่ให้แกเครื่องยนต์และความร้อนที่ให้แกเครื่องยนต์จริงเทียบกับความเร็วนรอบ

4. ผลการประเมินการสูญเสีย

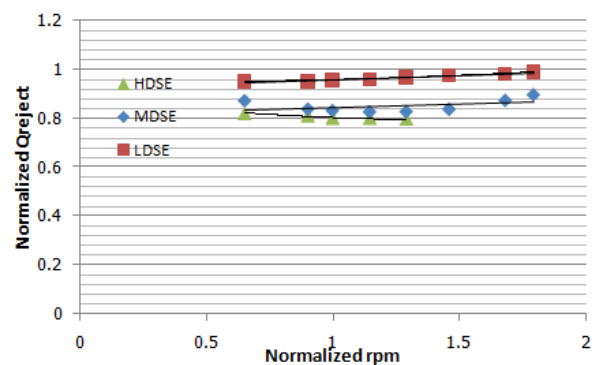
ผลการประเมินการสูญเสียด้วยเงื่อนไขการทดสอบข้างต้นที่กำลังขาออกสูงสุดแสดงดังรูปที่ 7 จากผลการประเมินพบว่า การสูญเสียหลักของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางที่ใช้ในการทดสอบที่กำลังขาออกสูงสุดคือ การสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ และความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ ซึ่งที่ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดนั้นจะมีการสูญเสียหลักเหมือนกันแต่จะมีค่าน้อยกว่าที่กำลังขาออกสูงสุด ทั้งในส่วนของการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์และความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ โดยสาเหตุของการสูญเสียหลักข้างต้นอาจเป็นผลจากการใช้ regenerator ที่ยังไม่เหมาะสมที่สุด และผนังของเครื่องยนต์มีความหนา

มากทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนมาก

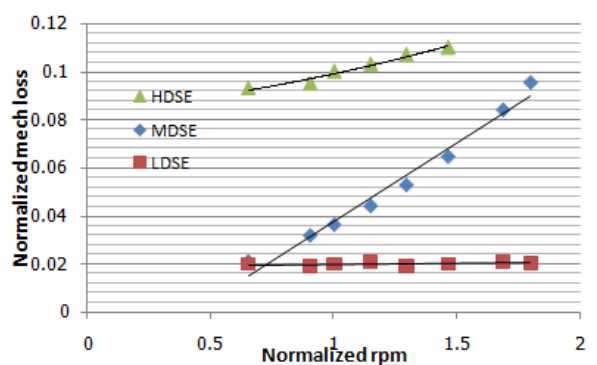


รูปที่ 7 ผลการประเมินการสูญเสียที่กำลังขาออกสูงสุด สำหรับการเปรียบเทียบการสูญเสียหลักของ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางกับ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิสูงและ อุณหภูมิต่ำพบว่า ความร้อนที่ระบายออกจาก MDSE จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบ เหมือนกับ LDSE คือมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่ เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น MDSE นำความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์จริง (Q_h) มา ใช้ได้ลดลงแสดงดังรูปที่ 8 ในส่วนการสูญเสียภายนอก เครื่องยนต์นั้น Iwamoto [5] ไม่ได้ทำการเปรียบเทียบ ไว้ ดังนั้นจึงไม่สามารถทำการเปรียบเทียบได้ สำหรับการสูญเสียทางกลของ MDSE มีลักษณะการ เปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบแบบเดียวกันกับ HDSE คือ การสูญเสียทางกลมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ความเร็วรอบอย่างเป็นเส้นตรงซึ่งเป็นผลมาจาก อุณหภูมิทำงานที่ค่อนข้างสูงของ HDSE และ MDSE ทำให้กลไกต่างๆของเครื่องยนต์เกิดการขยายตัว มากกว่า LDSE ดังนั้นแรงเสียดทานของส่วนต่างๆ ภายในกลไกของ HDSE และ MDSE จึงมีอัตราการ เปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นมากกว่า LDSE แสดงดังรูปที่ 9 ในส่วนของประสิทธิภาพ indicated นั้น จะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพ indicated ของ MDSE จะอยู่กึ่งกลางระหว่าง HDSE และ LDSE ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพทางทฤษฎี (Carnot efficiency) ที่ได้จากการประเมินด้วยสัดส่วนของ อุณหภูมิก๊าซทำงานแสดงดังรูปที่ 10 นอกจากนี้เมื่อ

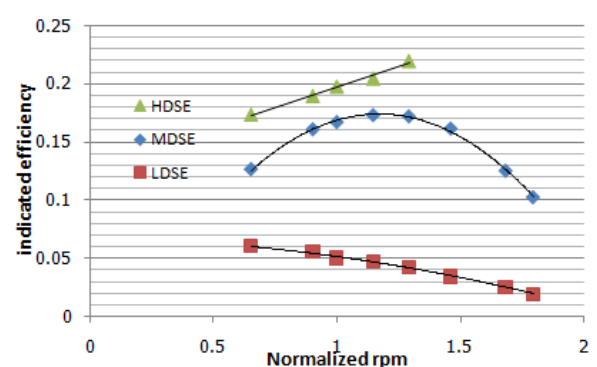
เปรียบเทียบกันระหว่างความร้อนที่ระบายออกจาก เครื่องยนต์และประสิทธิภาพ indicated จะเห็นได้ว่า เครื่องยนต์ MDSE นั้นจะมีประสิทธิภาพ indicated ค่อนข้างสูงใกล้เคียงกับ HDSE แต่มีการปล่อยความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์มากกว่า HDSE เพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า MDSE นั้นมีการใช้ ความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 8 ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์แบบไร้ มิติเปรียบเทียบกับความเร็วรอบ



รูปที่ 9 การสูญเสียทางกลแบบไร้มิติเทียบกับความเร็ว รอบแบบไร้มิติ



รูปที่ 10 ประสิทธิภาพ indicated แบบไร้มิติ เปรียบเทียบกับความเร็วรอบ

5.สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยพบว่า การสูญเสียที่เกิดขึ้นของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบด้วยกันแต่การสูญเสียหลักของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางซึ่งมีผลต่อสมรรถนะและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์อย่างมากคือ การสูญเสียภายนอกเครื่องยนต์ และความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ ในส่วนของการเปรียบเทียบการสูญเสียหลักของ MDSE กับ HDSE และ LDSE พบว่าความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ของ MDSE มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเหมือนกับ LDSE แต่ที่ความเร็วรอบเดียวกันจะมีค่าใกล้เคียงกับ HDSE ซึ่งแสดงให้เห็นว่า MDSE สามารถใช้ความร้อนที่ให้แก่อุปกรณ์จริงได้อย่างมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับ HDSE ถึงแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น สำหรับการสูญเสียทางกลของ MDSE มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบอย่างเป็นเส้นตรงเหมือนกับ HDSE ซึ่งแสดงให้เห็นว่า MDSE นั้นไม่เหมาะสมที่จะใช้งานที่ความเร็วรอบสูงเช่นเดียวกับ HDSE ในขณะที่ LDSE นั้นความเร็วรอบไม่มีผลกับการสูญเสีย แต่จากการประเมินการสูญเสียหลักพบว่าการสูญเสียทางกลมีค่าน้อยจึงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์มากนัก สำหรับประสิทธิภาพ indicated ของ MDSE จะอยู่ระหว่าง HDSE และ LDSE แต่มีค่าใกล้เคียง HDSE มากกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่า MDSE มีความคุ้มค่าในการผลิตและใช้งาน เนื่องจาก HDSE จำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีราคาแพงและหาซื้อได้ยากเพื่อให้ได้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่สูง แต่ MDSE นั้นใช้วัสดุที่หาได้ทั่วไปตามท้องตลาดซึ่งมีราคาถูก แต่ MDSE กลับมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับ HDSE

สำหรับแนวทางการลดการการสูญเสียหลักข้างต้นในการพัฒนาต่อไปอาจแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือการลดการสูญเสียภายใน regenerator และการลดการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนในส่วนต่างๆของเครื่องยนต์ สำหรับการลดการสูญเสียภายใน

regenerator สามารถทำได้โดยการเลือกใช้ regenerator ให้เหมาะสมที่สุดและสำหรับการลดการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนนั้นสามารถทำได้โดยการลดความหนาของผนังในส่วนต่างๆของเครื่องยนต์ลง เนื่องจากผนังในส่วนต่างๆของเครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบนั้นได้ทำการออกแบบไว้ให้มีความปลอดภัยในอัตราความดันเข้าสู่ระบบโดยออกแบบให้มีค่าความปลอดภัย 3.5 เท่าของความดันที่ใช้งานดังนั้นจึงสามารถลดความหนาของผนังในส่วนต่างๆของเครื่องยนต์ลงได้อีกเพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนที่เกิดขึ้นแต่วิธีการลดการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนนั้นกระทำได้ยาก ดังนั้นในงานวิจัยถัดไปจะศึกษาวิธีการเลือก regenerator ให้เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ลดลงและประสิทธิภาพ indicated เพิ่มขึ้น

6.เอกสารอ้างอิง

- [1] Koichi hirata (2003). Mechanical Loss Reduction of a 100 W Class Stirling Engine, paper presented in Proceedings of 11th International Stirling Engine Conference, November 2003, pp.338-343.
- [2] Noboru Kagawa. (2000). an experimental study of a 3-kw stirling engine, *ISSN*, vol. 3, May-June 2000, pp. 41-44.
- [3] Sanyo takahashi, et al. (2003). Hydrogen internal combustion Stirling engine , *JSME International Journal*, series B vol. 46 No.4, 2003, pp. 633-642.
- [4] ชนะ ศรีคำ (2552).การออกแบบและสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลต่างอุณหภูมิปานกลางสำหรับใช้ร่วมกันกับพลังงานแสงอาทิตย์, วิทยานิพนธ์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [5] Toshio Otaka, et al. (2001). Experimental Study on a Stirling Cycle Machine of 100W Design Capacity, paper presented in *International*

Conference on Power Engineering-2007,
Hangzhou, China.

[6] Iwamoto, S., et al. (1997). Comparison of low- and high temperature differential Stirling engines, paper presented in Proceedings of 8th International Stirling Engine Conference, 1997, pp. 29-38.

[6] Artin Der Minassians (2007). *Stirling Engines for Low-Temperature Solar-Thermal Electric Power Generation*, Electrical Engineering and Computer Sciences University of California at Berkeley

[7] C.M Hargreaves (1995). *The Philips Stirling Engine*, formerly of the Philips Laboratories Eindhoven, Netherlands.